

Projekt i pomiary trójfazowej sieci sztucznej do pomiaru zaburzeń przewodzonych w zakresie od 9 kHz do 30 MHz

Streszczenie. Celem pracy było zaprojektowanie, wykonanie a następnie przebadanie sieci sztucznej w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz o prądach roboczych do 100 A. W artykule przedstawiono sieć sztuczną typu V stosowaną do pomiaru napięć występujących pomiędzy każdym z przewodów zasilania sieciowego a ziemią odniesienia. W opracowaniu przedstawiono problematykę budowy takiej sieci sztucznej wykorzystywanej w torach zasilania do pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych generowanych przez obiekty elektryczne. Badania takie stosowane są w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej do wymagań cywilnych. Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 55016-1-2 zbudowano model matematyczny dla rozważanej sztucznej sieci. Obliczenia z jego wykorzystaniem pozwoliły na uchwycenie wpływu istotnych elementów i czynników konstrukcyjnych na wartość unormowanej impedancji określonej w normie. Sztuczna sieć pomiarowa wykonana w oparciu o zaproponowaną aplikację z powodzeniem może być wykorzystana w badaniach wstępnych w laboratorium kompatybilności jak również jako stanowisko dydaktyczne.

Abstract. The purpose of this paper was to design, fabricate and then test an artificial network in the frequency range from 9 kHz to 30 MHz with operating currents up to 100 A. The paper presents a V-type artificial network used to measure the voltages occurring between each of the power supply conductors and the reference ground. The paper presents the problem of constructing such an artificial network used in power supply paths to measure conducted electromagnetic disturbances generated by electrical objects. Such tests are used in the field of electromagnetic compatibility for civil requirements. In accordance with the recommendations of PN-EN 55016-1-2, a mathematical model for the considered artificial network was built. Calculations using it made it possible to capture the influence of significant elements and design factors on the value of normalized impedance specified in the standard. The artificial measurement network made on the basis of the proposed application can be successfully used in preliminary research in the compatibility laboratory as well as a teaching station. **(Design and measurements of a three-phase artificial network for measuring conducted disturbances in the range from 9 kHz to 30 MHz)**

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia przewodzone, sztuczna sieć pomiarowa typu V, stabilizator impedancji sieci

Keywords: electromagnetic compatibility, conducted disturbances, artificial V-type measurement network, network impedance stabilizer

Wstęp

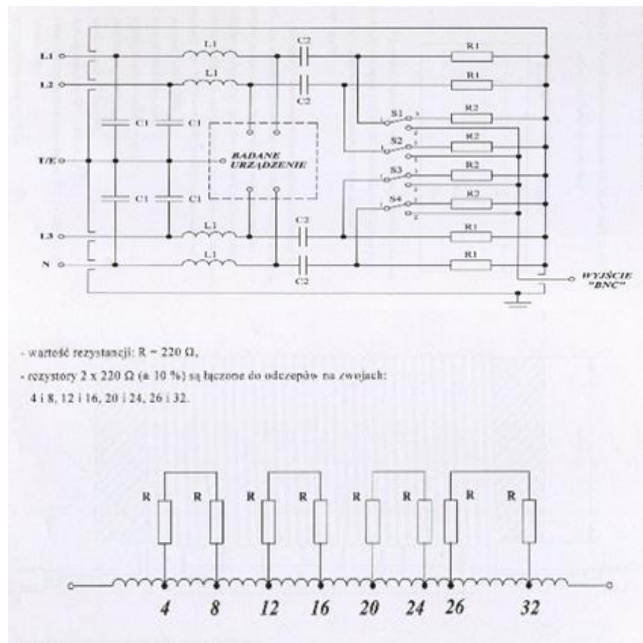
Siecią sztuczną nazywamy stabilizator impedancji sieci zasilającej. Pozwala on na dostarczenie napięcia zasilającego do badanego obiektu; zaburzenia emitowane przez badane urządzenie na drodze przewodzonej, a następnie umożliwiają ich pomiar za pomocą odbiornika podłączonego do jej portu RF. Budowa pozwala na stabilizację impedancji sieci zasilającej; eliminuje zaburzenia od strony sieci zasilającej, a także nie pozwala aby zakłócenia emitowane przez badane urządzenia dostawały się do sieci elektroenergetycznej [1, 2]. W pomiarach zaburzeń przewodzonych w przypadku obiektów cywilnych powszechnie są wykorzystywane sztuczne sieci typu V. Schemat budowy sieci oraz charakterystyczne parametry są zawarte w normie PNEN 55016-1-2. Schemat sieci sztucznej typu V, przedstawiono na rysunku 1. Urządzenie to posiada trzy zaciski - sieciowe, zasilające EUT oraz port pomiarowy do podłączenia odbiornika pomiarowego [4]. Pod względem funkcjonalnym sztuczna sieć pomiarowa jest układem filtrów dolnoprzepustowego (LPF) do filtracji zakłóceń sieciowych oraz górnoprzepustowego (HPF) doprowadzającego do gniazda pomiarowego ograniczone w paśmie przebiegi zaburzeń emitowane przez badane urządzenie [1, 2]. Obszar zastosowań sieci typu V zależy od wartości indukcyjności, która kształtuje wymaganą wartość modułu impedancji. Do zastosowań cywilnych i wojskowych wykorzystywane są sieci 50 μH . Pozwalają one na badanie urządzeń zasilanych napięciem przemiennym i stałym o częstotliwościach od 9 kHz do 30 MHz [2]. W technice pomiarowej wykorzystywane są także sieci 5 μH . Pozwalają one na pomiar w znacznie szerszym zakresie częstotliwości do 150 MHz. Sieci takie są wymagane w pomiarach realizowanych zgodnie z wymaganiami standardu motoryzacyjnego CISPR 25, ISO 7637 czy lotniczego RTCA - DO160. Wszystkie dostępne na rynku sieci sztuczne konstruowane są z elementów pasywnych. Stosownie do zaleceń standardu

PN-EN 55016-1-2 połączone elementy R, L, C, o podanych w normie wartościach pozwalają uzyskać wymagane przebiegi modułu impedancji i fazy [4,5,6]. Komponenty L_1 , C_1 , R_1 wraz z impedancją wejściową odbiornika pomiarowego określają wartość zespolonej impedancji stabilizatora, natomiast kondensator C_2 zabezpiecza odbiornik pomiarowy przed przebiegami napięcia zasilającego badane urządzenie. Zamieszczone na rysunku 2 wartości elementów są zalecane przez normę PN-EN 55016-1-2 dla jej wersji z dolną częstotliwością pomiarową o wartości 150 kHz. Sztuczna sieć skonstruowana w oparciu o ten schemat jest optymalna jeśli posiadamy czyste źródło zasilania. W przypadku zasilania badanych urządzeń z sieci elektroenergetycznej wskazane jest rozbudowanie sieci o dodatkowy człon z filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości granicznej znacznie oddalonej od jej dolnej częstotliwości pomiarowej [7-10]. Filtr taki zbudowany jest z cewki powietrznej 250 μH i kondensatora 4 μF połączonego szeregowo z rezystorem o rezystancji 10. Konstrukcja cewki 50 μH Najistotniejszym elementem konstruowanego urządzenia są cewki powietrzne 50 Ω , μH kształtujące wartość modułu impedancji w torze przewodu fazowego i neutralnego sieci jednofazowej. W przypadku sieci trójfazowej w sieci mamy cztery takie cewki. Przykładowa konstrukcja cewki powietrznej 50 Ω , μH jest opisana w normie PN-EN 55016-1-2. Element ten charakteryzuje się jednak bardzo dużymi wymiarami geometrycznymi i nieoptymalną średnicą drutu nawojowego w stosunku do założonej obciążalności prądowej projektowanej sieci. Istotny w procesie projektowania tego elementu jest fakt, że cewka umieszczona w ekranie zmniejsza swoją indukcyjność. Przystępując do projektowania modelowej sztucznej sieci założono, że będzie ona pozwalała na pomiary w paśmie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz i umożliwi pomiary w obwodach o obciążalności do 100 A. Sieci sztuczne stosowane są w pomiarach napięć wielkiej częstotliwości w

zakresach od 9 kHz do 30 MHz przy prądach roboczych do 500 A. Przedmiotem opracowania jest sieć sztuczna typu V stosowana do pomiaru napięć występujących pomiędzy każdym z przewodów zasilania sieciowego a punktem odniesienia. W artykule omówiono problematykę budowy takiej sieci sztucznej wykorzystywanej w torach zasilania do pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych generowanych przez obiekty elektryczne. Badania takie stosowane są w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej do wymagań cywilnych [1] np. w przypadku robotyki [11, 12].

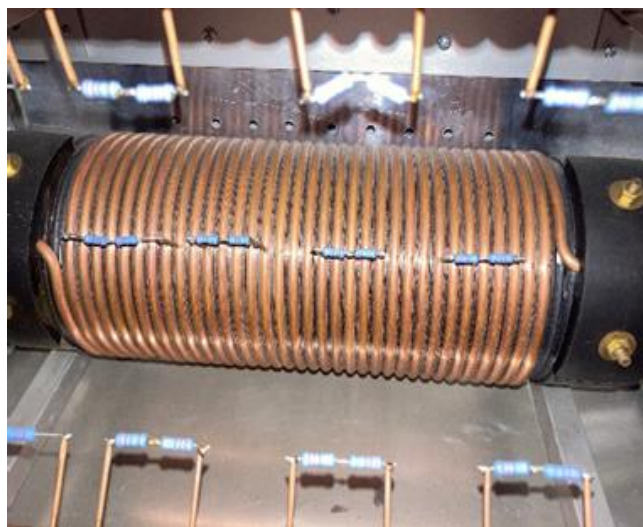
Układ pomiarowy

Przedstawiony na rys. 1 schemat sieci sztucznej posłużył do jej wykonania. Układ ten może być stosowany do konstrukcji sieci sztucznych na prądy do 100 A.



Rys.1. Schemat modelu sieci sztucznej typu V, sekcjonowania uzwojenia cewki indukcyjnej sieci sztucznej wraz z odczepami

Na rysunku 2a i 2b przedstawiono rzeczywisty widok rzeczywisty wykonanej aparatury pomiarowej tzw. sieci sztucznej



Rys.2a. model rzeczywisty sieci sztucznej wraz z odczepami



Rys.2b. Model rzeczywisty sieci sztucznej

Założenia projektowe sieci sztucznej trójfazowej osiągnięto wykorzystując w konstrukcji urządzenia o dużej nominalnej obciążalności prądowej do 100 A. Cewki są elementem kluczowym ze względu na ich rozmiar, wagę i sposób wykonania. Konstrukcja bezrdzeniowa (cewka powietrzna) jest istotna ze względu na zjawisko nasycenia przy szczytowych obciążeniach prądowych.

Cewki wymuszają wymiary zastosowanej obudowy, konstrukcje szkieletu wewnętrznego, profile blach zapewniają chłodzenie, a także usytuowanie elementów wewnętrznych (kondensatory, rezystory). Materiały użyte do budowy sieci sztucznej są zgodne z szczegółowym opisem zawartym w normie [5]. Dla dużych poziomów zakłóceń sieciowych należy zastosować filtr zapewniający zmniejszenie niepożądanych sygnałów które powinny być przynajmniej o 10 dB mniejsze od wartości mierzonych przez odbiornik pomiarowy. Prezentowana sieć zabezpiecza wejście miernika zakłóceń przed napięciem sieci zasilania dla czterech przewodów zasilania. Zastosowana sekcja przełączników: S_1, S_2, S_3, S_4 umożliwia dołączenia odbiornika pomiarowego do mierzonego przewodu sieciowego przy poprawnym obciążeniu pozostałych przewodów sieciowych. Do podłączenia odbiornika pomiarowego zastosowano gniazdo BNC. Elementy L_1, C_1, R_1 określają impedancję a element C_2 zapewnia odpowiednią izolację miernika zakłóceń od napięcia sieci zasilającej. Przyrząd ten jest uniwersalnym urządzeniem umożliwiającym pomiary w różnych konfiguracjach stanowisk pomiarowych do badania zakłóceń przewodzonych w szerokim zakresie obciążalności, prostym w obsłudze, bezpiecznym w użytkowaniu oraz spełniającym wymagania przedmiotowej normy w zakresie konstrukcji i parametrów technicznych.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażony w analizator widma Siglent SSA3021, stabilizator impedancji, model trójfazowej sieci sztucznej, badane urządzenie przedstawiono na rys 3. Stanowisko to jest na wyposażeniu Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej oraz Badań Elektrycznych w Systemach Biotechnicznych, Wydziału Inżynierii Produkcji i

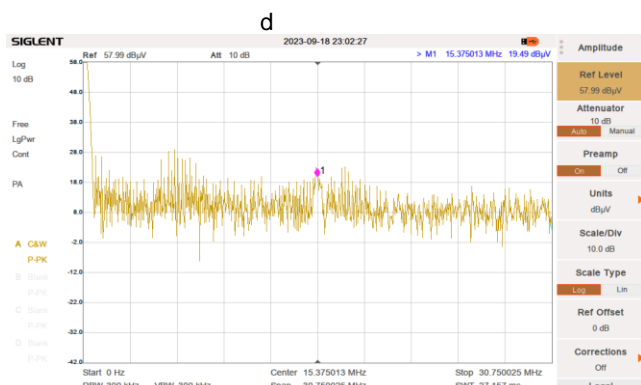
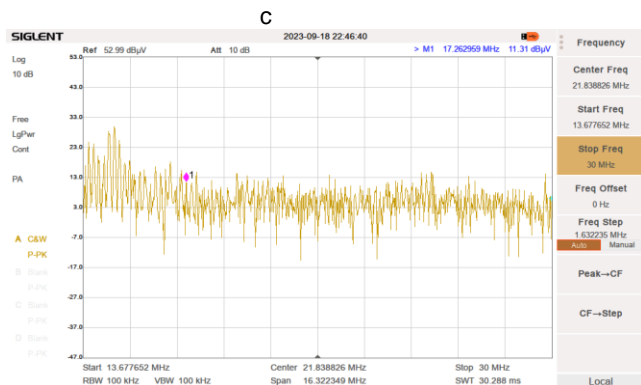
Energetyki Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie. Podczas przeprowadzania badań ustalono dokładność z jaką model sieci sztucznej jest w stanie odwzorować zakłócenia generowane przez badane urządzenie oceniając symetrię odwzorowania widmowego. Badanie wykonano w pewnych odstępach dla charakterystycznych dla zakłóceń przewodzonych zakresów częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz.



Rys.3. Zdjęcie stanowiska pomiarów zaburzeń przewodzonych (Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej oraz Badań Elektrycznych w Systemach Biotechnicznych)

Istotną rolę dla stanowiska pomiarowego (rys.3). Odgrywa przewód zasilania badanego urządzenia. W celu zapewnienia ściśle określonego obciążenia podczas wszystkich pomiarów napięć zakłóceń na zaciskach (zasilania i innych). Zgodnie z wymaganiami normy [5] sieć sztuczną od badanego urządzenia należy umieścić w odległości 0,8 m na stoliku umieszczonym na płaszczyźnie uziemiającej.

Przykładowe zarejestrowane charakterystyki wykonane zbudowaną siecią sztuczną przestawiono na rysunkach 4a - 4d.



Rys. 4.a.b.c.d. Przykładowe zarejestrowane charakterystyki przy dołączeniu wybranego urządzenia do badanego do zacisku L₁ sieci sztucznej

Otrzymane wyniki w postaci widm częstotliwościowych wykazują dużą zbieżność, jednak ze względu na możliwą zmienność badanego urządzenia nie można wykluczyć drobnych różnic między nimi, o czym decyduje krótki czas rejestracji. Badania potwierdziły, że w zakresie symetrii przenoszonych zakłóceń pomiędzy poszczególnymi częściami, badanej trójfazowej sieci sztucznej utrzymuje ona parametry na zbliżonym poziomie kolejno poszczególnych faz na zaciskach L₁, L₂ oraz L₃.

Podsumowanie

Zaprojektowana i wykonana sieć sztuczna typu V pozwala na badanie urządzeń trójfazowych dużej mocy takie jak prądnice, przetwornice, silniki komutatorowe, elektroniczne układy przekształtnikowe i wiele innych. Prezentowana sieć sztuczna przy odpowiednim połączeniu spełnia wymagania normy PN-EN 55016-1-2 także jako sieć sztuczna jednofazowa.

Autorzy: dr inż. Tomasz Drózdź, prof. URK Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: tomasz.drozd@urk.edu.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Emerytowany pracownik Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej, mgr inż. Paweł Pysz, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: pawel.pysz@urk.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Więckowski T. Badania kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [2] Nizioł, M., Sabat, W., Nawara, P. Modelowanie sztucznej sieci do pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych w zakresie częstotliwości 150 kHz – 30 MHz, Przegląd Elektrotechniczny, NR 12 (2019), s. 76- 80.
- [3] Bogatin E., Signal Power Integrity – Simplified, 3rd Edition, Prentice Hall, (2018).

- [4] PN-EN 55016-1-2:2014-09, Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia. Część 1-2: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności – Układy sprzęgające dla pomiarów zaburzeń przewodzonych
- [5] PN-EN 55011:2016-06, Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne. Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej. Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru
- [6] PN-EN 55014-1:2017-06, Kompatybilność elektromagnetyczna. Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń. Część 1: Emisja
- [7] PN-EN 55015:2013-10, Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez elektryczne urządzenia oświetleniowe i urządzenia podobne
- [8] Charoy A. Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych. Tom 4. WNT. Warszawa 2000.
- [9] PN-EN 55016-1-2:2014-09, Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia. Część 1-2: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności – Układy sprzęgające dla pomiarów zaburzeń przewodzonych.
- [10] PN-EN 55032:2015-09, Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń multimedialnych -- Wymagania dotyczące emisji.
- [11] Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Kiełbasa P., Mirosław Jabłoński M., Pawlik P., Piłat A. Walczyk J. Szczepaniak J., Juliszewski T., Szaroleta M. Automation of the Acorn Scarification Process as a Contribution to Sustainable Forest Management. Sustainability, nr. 9 (2017).
- [12] Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Kiełbasa P., Jabłoński M., Bubleński Z., Grabska-Chrzęstowska J., Kaliniewicz Z., Walczyk J., Szczepaniak J., Juliszewski T., Szaroleta M. Assessment of selected parameters of the automatic scarification device as an example of a device for sustainable forest management, Sustainability nr. 9 (2017).